

パルス循環法による超音波計測の研究 (第1報)

— 装置の特性について —

石 田 美 雄^{*}・原 田 義 文^{**}

Studies on the Ultrasonic Measurement by Means of the Sing-Around Method (I)

— On the Characteristics of the Apparatus —

Yoshio ISHIDA, Yoshibumi HARADA

The "Sing-around" method was tested, by which velocities of ultrasound in liquids could be measured accurately and the results recorded continuously. The method consists of the following three measurements: 1) the measurement of the repetition frequency f of the pulses which circulate through the wave sender, the testing material, the wave receiver and the external electronic circuit, 2) the measurement of the effective distance l (sound path length) between sender and receiver, 3) the measurement of the time delay t_d of the external electronic circuit. In order to eliminate the measurement of t_d , the method of variable path length was proposed by Ficken and Hiedemann. The method of fixed path length was developed, also, by Greenspan and Tschiegg. In the latter case, the determination of l and t_d was made by using the standard liquid—distilled water in this case—, whose velocities of sound were well known. The both methods were herein tested. It was found that the former method could not give satisfactory results. The reason is ascribed to the fact that the actual variation of the distance between sender and receiver does not coincide with the effective variation of the sound path length. Tracing the latter method, we could get very accurate results by the measurement of time interval T between N pulses, instead of measuring the repetition frequency f . The time interval between N pulses could be measured by inserting the cascaded binary scaler which send one pulse, only when it has received N pulses. The characteristic constants l and t_d of our apparatus were given as 14.05 cm and 17.02 μ s. The measured value of l is shorter than the actual distance between sender and receiver. The reason is reduced to the multiple reflections of sound between sender and receiver. The variation of T versus temperature becomes up to -1003.5 [μ s/ $^{\circ}$ C]. The result indicates that the apparatus is possible to be used as a sound thermometer.

1 緒 言

液体、気体中の超音波の速度を測定する方法はいろいろあるが、その中でパルス循環法 (Sing-around Method) は比較的高い精度を与え、かつ、結果の連続記録も可能であるので、近ごろよく使用されるようになってきた。その原理は次のようである。電気-音響変換素子Ⅰ (送波子) とⅡ (受波子) を試料中に置き、Ⅰに電気的パルスを与えると試料中に衝撃的の音波が発生し、これがⅡに到達するとそこに再び電気的パルスが生ずる。このパルスを増巾したものを送信機に対するトリガとすれば、Ⅰに電気的パルスが循環的に加えられる。このようにして

→送波子→試料→受波子→外部電気回路→

をめぐってパルスの循環が起る。このときのパルスの繰返し周波数 f は試料中の音速を v とすれば

* 教授 ** 助手

$$1/f = l/v + t_d \quad \dots\dots\dots(1)$$

で示される。ここに、 l は送波子-受波子間の有効距離(音路長)で、 t_d は外部電気回路による遅れ時間である。したがって、 l および t_d がわかったとすると、繰返し周波数 f を測定することによって音速 v を知ることができる。

Ficken と Hiedeman⁽¹⁾は外部回路の遅れ時間 t_d を消去するために音路長 l を可変にする方法を提案し、Greenspan と Tschiegg⁽²⁾は音路長 l は一定に保ち音速のよく知っている液体-蒸留水-を用いて l 、 t_d を実験的に決定した。さらに彼等は標準となる蒸留水の音速を pulse coincidence method によって精密に求めた⁽³⁾。

筆者らは音路長を可変にする方式も、音路長を一定にする方式をも追試し、さらに、パルスの繰返し周波数を測定するよりも、 N 個のパルスの時間間隔を測定した方がより精度が上ることを認めた。この方法によって試料槽の音路長 l および外部回路の遅れ時間 t_d を測定した結果について第1報を送る。

なお、この研究は最初は溶液の濃度と音速との関係を求め、それによって溶液中のイオンや分子の行動の一部を明らかにするために始めたのである。応用としては、二成分系の溶液の濃度と音速との関係がわかれば超音波濃度計としての利用が考えられる。また、一定の試料中の温度と音速との関係がわかれば超音波温度計としての使用が可能となる。

さらに、気体を試料とするパルス循環法によって、超音波風速計や空気中の微量ガスの検出等の応用が期待される。

2 可変音路長の場合

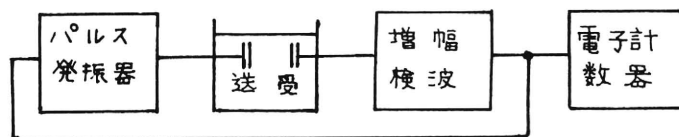
(1) 式において回路の遅れ時間 t_d を消去するために、送波子に対して受波子を移動できるようにする。そして二つの音路長 l_1 、 l_2 に対する繰返し周波数 f_1 、 f_2 を測定すると

$$1/f_1 = l_1/v + t_d, \quad 1/f_2 = l_2/v + t_d$$

が成立するので、この二式より t_d を消去すれば

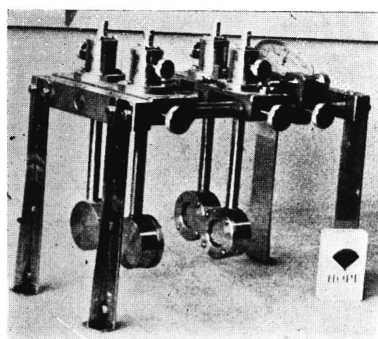
$$v = \frac{f_1 f_2}{f_2 - f_1} \cdot (l_1 - l_2) \quad \dots\dots\dots(2)$$

を得る。よって音路差($l_1 - l_2$)を測定すれば上式によって音速が計算できる。この考を実験するために、第1図に示すブロック図のような装置を作

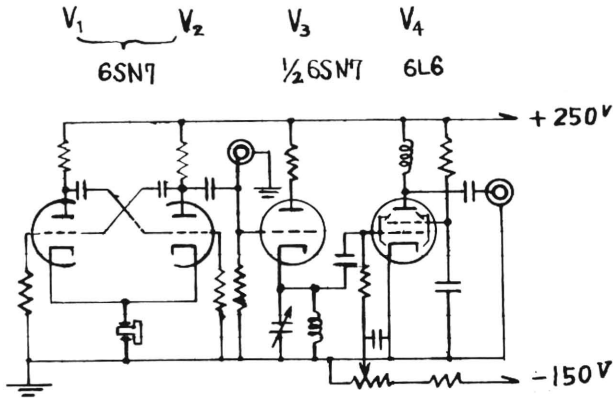


第1図 パルス循環のブロック図

った。送波子、受波子は共に 1 Mc の X-cut の水晶振動子であり、その保持器、移動機構などは第2図の写真に示すようであって、受波子の変位はダイヤル・ゲージで読み取れる。送波子と受波子の対をステンレス製の角型の試料槽の中に挿入する。それらをさらに容積約 18.5 l の恒温液槽の中に入れ、その液温は電子管式の温度調節器によって $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 以内に調節できるようにした。送信機は第3図に示すようであって、三極管 6SN7 は格子にパルスが入ったときのみ発振し、パルスで変調された 1 Mc の信号を発生する。この信号を 6L6 で増巾して、送波子を駆動するのに使用する。受信機は第4図に示すようであって、三段のスタガされた高周波増巾器を持っている。

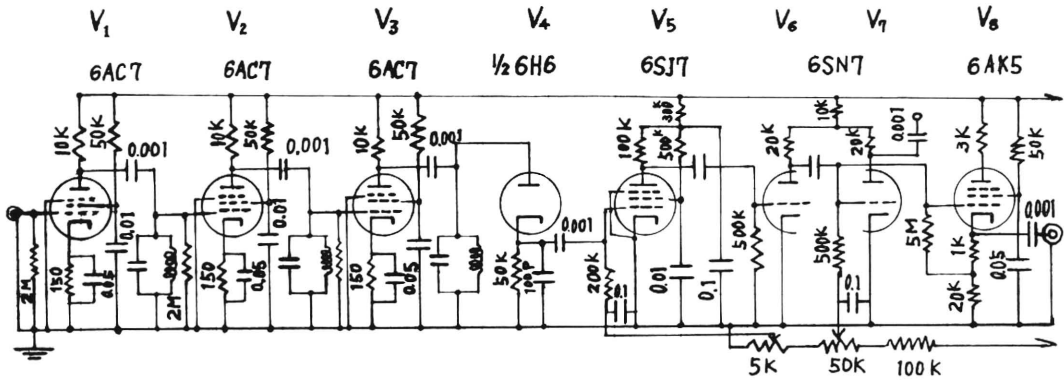


第2図 水晶振動子保持器

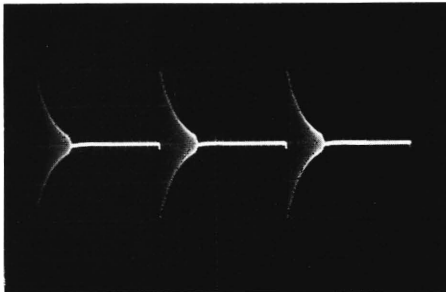


第3図 送信機回路図

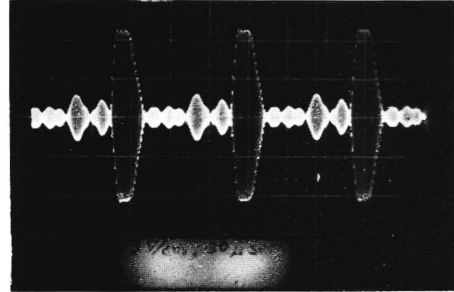
信号はここで増巾，検波，位相反転された後，送信機の発振管をトリガするのに使用される。パルス循環を起すための最初のパルスは送信機の中にあるマルチバイブレータによって作る。すなわち，マルチバイブレータの陰極にある押しボタンがパルス循環の起動に用いられる。パルス循環が起っているときの各部の波形をシンクロスコープで観察すると，第5図の写真のようになる。(a)図は送信機出力パルスで送波子に入



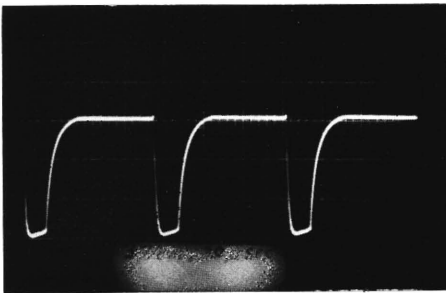
第4図 受信機回路図



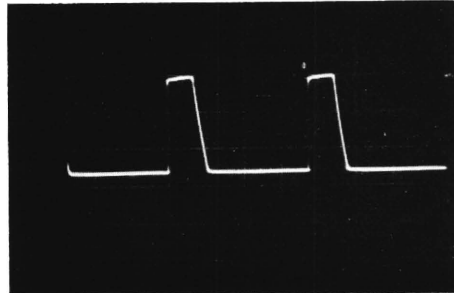
(a) 送信機出力波形



(b) 受信機の検波器直前の波形



(c) 送信機へ戻るとリガの波形



(d) 計数器への波形

第5図 パルス循環における各部の波形

るところ、(b)図は受信機の検波器の直前、(c)図は送信機に戻るトリガ・パルスであり、(d)図は電子計数器に入って繰返し周波数 f の計数を与えるパルスである。

このような装置によって蒸留水を試料とし、送波子と受波子の距離を少しずつ変化させてそれに対応する繰返し周波数 f を読み、式(2)によって音速を計算した。その一例を第1表に示す。

第1表 蒸 留 水 の 音 速 度 $29.7^{\circ}\pm 0.05[^{\circ}\text{C}]$

l_1-l_2 [mm]	f_2 [c/s]	f_1 [c/s]	v [m/s]
3.00	12175.6	11885.5	1496
4.30	11885.5	11497.8	1515
3.91	11497.8	11168.9	1526
7.30	12175.6	11497.8	1507
8.21	11885.5	11168.9	1520
11.21	12175.6	11168.9	1514
平均 値			1513[m/s]
承認されている値			1509[m/s]

計算された v の値が一定とならず、かなりのばらつきが見られるが、その理由として次の二つが考えられる。第1はダイヤル・ゲージの目盛の不整であり、第2は送波子-受波子間の幾何学的な距離変化が音路長の変化と一致しないためである。送波子と受波子の間には直接波だけでなしに多重反射波が存在する。それらは互に干渉して受波子に効果を及ぼすので、送波子-受波子間の幾何学的距離が音路長であるとはいえないのである。この現象は理論的な解析が困難なので補正をする方法がない。それで可変音路長の方法は音速の精密測定としては適当でないといえる。

3 固 定 音 路 長 の 場 合

送波子-受波子の距離を一定とし、それと試料槽との相対位置も一定にして、音速既知の標準液体によってパルス循環を行なわせると式(1)における未知量 l と t_d を求めることができる。一度これらの値が決まると、それに基づいて任意の液体の音速を求めることができる。この標準液体として蒸留水を使用する。その音速 V [m/s]は Greenspan-Tschiegg⁽²⁾ によって温度 θ [°C] の5次式として

$$V = A + B\theta + C\theta^2 + D\theta^3 + E\theta^4 + F\theta^5 \quad \dots\dots\dots(3)$$

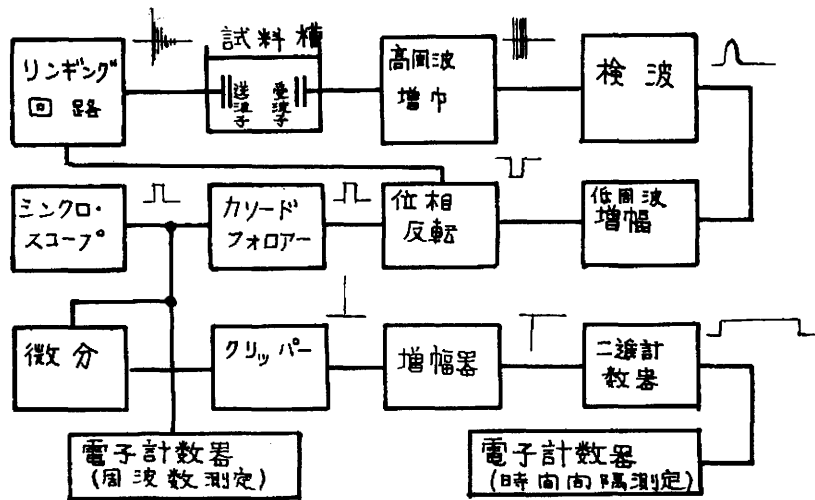
のごとく与えられている。ここに、 $A=1402.736$, $B=5.03358$, $C=-0.0579506$, $D=3.31636 \times 10^{-4}$, $E=-1.45262 \times 10^{-6}$, $F=3.0449 \times 10^{-9}$ である。

試料槽に蒸留水を入れ、その温度をゆるやかに変化させ、その温度に対応する繰返し周波数 f を測定すれば、(1),(3)式より l , t_d を求めることができる。

ここでは繰返し周波数 f の測定と並行して、繰返しの周期 $1/f$ の N 倍を測定することを試みた。すなわち

$$T = N (l/v + t_d) \quad \dots\dots\dots(4)$$

において v の変化による T [μs]を測定して、それより l , t_d を求めるのである。この方がより精度が上がる事が証明された。第6図にそのブロック図を示す。これは要するに第1図に示したパルス循環回路に二進計数器を付加して、その出力パルスの時間間隔を電子計数器で測定するものである。この二進計数器は13段のフリップ・フロップよりなっているので、入力に $N=2^{13}=8192$ 個のパルスが来たとき初めて1個の出力パルスを生ずる。よってこの二進計数器の出力パルスの時間間隔が(4)式の T を与える。



第6図 二進計数器付パルス循環のブロック図

試料槽に蒸留水を入れ、室温より少し高目の温度にしておき、攪拌しながらゆっくり自然冷却させる。そのときの電子計数器のカウンタを試料槽の温度に対して記録する。電子計数器のカウンタは繰返し周波数測定の場合は10秒間の計数であり、時間間隔測定の場合は $1\mu\text{s}$ を単位とする計数である。試料槽の温度はベックマン温度計によって $1/100^\circ\text{C}$ まで読んだ。その結果は第7図、第8図に示されているように、せまい温度範囲では f および T は温度 θ に対して直線的に変化している。これはこの装置が温度計として利用できる事を意味している。その場合の感度は直線の勾配によって決る。第11図の直線の勾配 $a_1=f/\theta=10.27[\text{cycle}/^\circ\text{C}]$ であり、第12図の直線の勾配 $a_2=T/\theta=-1003.5[\mu\text{s}/^\circ\text{C}]$ である。この勾配を $[\text{count}/^\circ\text{C}]$ で表わすと、 f 測定の場合は10秒間計数するのでほぼ $100[\text{count}/^\circ\text{C}]$ となる。それでも T 測定の方が約10倍の感度を持っており、計測時間もほぼ1秒なので、こちらの方が精密温度計としてずっと優秀な事がわかる。ほぼ $1/1000[^\circ\text{C}]$ まで読みとれる勘定になる。また、これらの直線上の二点を取って l および t_d を計算すると第2表のようになった。

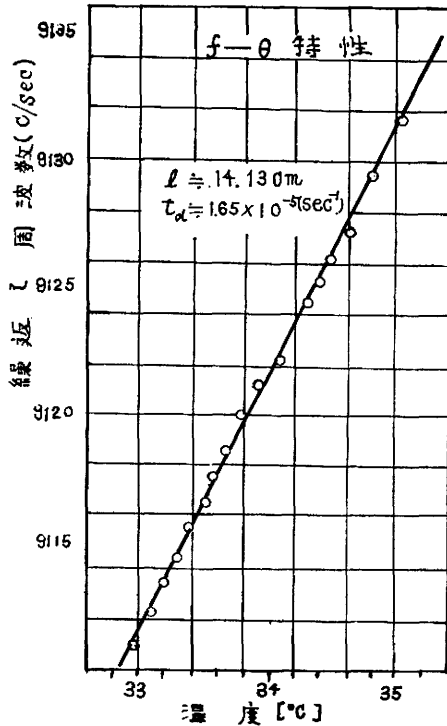
第2表 音路長とおくれ時間

	l	t_d
f — 測定	14.13 cm	16.55 $[\mu\text{s}]$
T — 測定	14.05 cm	17.02 $[\mu\text{s}]$

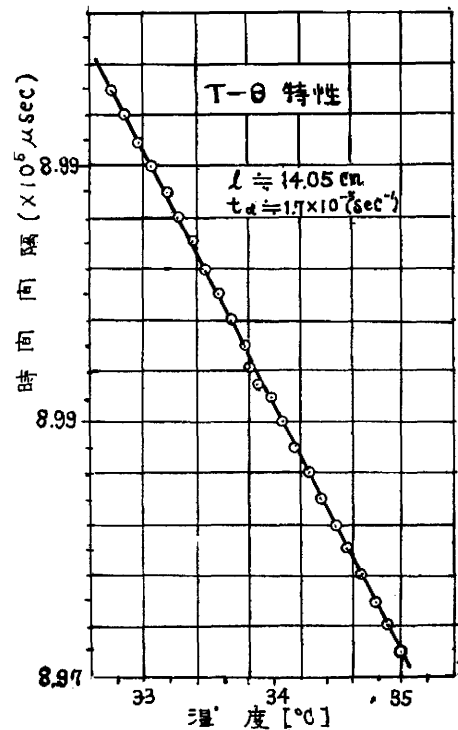
両方の測定から計算した l と t_d はそれぞれほぼ一致している。この事は二進計数器が正常に働いている事を意味する。この場合送波子—受波子間の距離は約18cmであるから、音路長はそれよりかなり短い。

4 結 果 の 考 察

パルス循環法を用いて、液体の音速を測定する場合に、送波子—受波子の距離を変化させる方式は精密測定には不適当である事が明らかとなった。その理由は音波の多重反射のために幾何学的の距離と有効音路長とが異なるためである。送波子—受波子間の距離を一定にし、それらと試料槽の相対位置も一定にして、蒸留水の音速を基準として有効音路長を求めると、それは送波子—受波子



第7図 繰返し周波数の温度特性



第8図 時間間隔の温度特性

間の距離よりも短くなることがわかった。このことは可変距離法の不適当である理由の推定に裏付けを与える。しかし、何故に有効音路長が幾何学的距離より短くなるかということについて、物理的な解明は未だなされていない。それはともあれ、 l および τ_d さえ決定されればこの装置は音速や温度の精密測定に使用できる。その際、パルス循環の繰返し周波数の測定よりも、それに二進計数器を付加して時間間隔を測定した方がより精度が上がる事が明らかとなった。

この実験に用いた試料槽は角型の槽であって上部より送波子と受波子を挿入するようになっている。これは境界条件が複雑であって理論的な解析に対して不向きであるし、また、固定距離の実験に対しても不便である。そこで現在では円筒形の管の両端に振動子を固着した形式のものを試作して実験を進めている。温度の測定にはベックマン温度計の代わりに白金抵抗温度計を使用し、試料槽全体をデュワー氏びんの中に入れて測定を行う予定である。なお、実験に協力して下さった学生南谷篤、石田亮一の両君に感謝する。

また、この研究は昭和39年5月、日本音響学会研究発表会において講演したものである。

文 献

- 1) G. W. Ficken and E. A. Hiedeman ; J. Acoust. Soc. Am. **28** (No.5), 921-923, (1956)
- 2) M. Greenspan and C. E. Tschiegg ; Rev. Sci. Instr. **28** (No.11), 897-901, (1957)
- 3) M. Greenspan and C. E. Tschiegg ; J. Res. Nat. Bur. Stand. **59** (No.4), 249-254, (1957)

(昭和39年9月29日受理)